低レイノルズ数オリフィス噴流のLDV測定*

鷲尾 誠一^{*1}, 小西 忠孝^{*1}, 馬場 充^{*1}
坂口 正^{*2}, 神谷 正人^{*3}

LDV Measurements of Orifice Jet Flows at Low Reynolds Numbers

Seiichi WASHIO, Tadataka KONISHI, Mitsuru BABA,
Tadashi SAKAGUCHI and Masato KAMIYA

Measurements of orifice jet flows in oil hydraulic tubes with LDV were carried out in order to clarify the flow structure which causes the peculiar behavior in the pressure recovery previously discovered by some of the present authors. The findings are as follows: with Re around 200, the orifice jet flow starts to become turbulent, exhibiting observable pressure recovery. In a typical turbulent jet flow of a low Reynolds number the axial velocity rapidly decreases downstream, and then gradually increases until it reaches the velocity of the corresponding Poiseuille laminar flow. In this rapid deceleration field, a small percentage of the kinetic energy of the main flow is restored to the static pressure, while most of it is consumed to develop turbulence which becomes most intense at the end of the field. The deceleration field travels noticeably downstream as Re decreases below 1000, which coincides with the movement of the pressure recovering region.

Key Words: Orifice Jet Flow, Pressure Recovery, Local Turbulence, Laminar Restoration, LDV, Laminar-Turbulent Transition, Oil Hydraulic Tube

1. 緒 言

著者らは先に、油圧管路においてオリフィス下流の管壁圧力軸方向連続分布を測定することにより、レイノルズ数の低いオリフィス噴流では、圧力回復点がレイノルズ数の低下につれて下流へと移動することを見いだした⁽¹⁾。この報告は、油圧管路のオリフィス噴流をレーザドップラー流速計(LDV)を使って測定し、そうした圧力回復点の移動現象を流れの構造の面から解明せんとするものである。

2. 実験装置および方法

油圧回路とLDV測定系を含む実験装置全体の構成を図1に示す。

ポンプとリリーフ弁の定圧源から送り出された油は、10 μ m ラインフィルタ、流量制御弁、オリフィス形差圧流量計を経て、測定部に供給される。測定部は、先の連続圧力分布測定に使用した、先端に試験オリフィスをもつピストンアームと流出側ピストンアーム

を、およそ0.8 m 離して向かい合せ、それに長さ1 m のアクリル管(内径20 mm, 外径26 mm)をはめて水平に支持したものである。試験オリフィスを通る油の流量は、上流のオリフィス流量計(精度1%)で、温度はアクリル管に取付けたサーミスタ温度計で測定する。実験中は、測定用パーソナルコンピュータの割込み機能を使って、サンプルした温度データをPID演算し、その結果で四つの電磁弁をON-OFFさせてオイルクーラの水量を調節することで、油温を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

図1 実験系の構成

* 原稿受付 平成2年3月6日。

^{*1} 正員、岡山大学工学部(〒700 岡山市津島中3-1-1)。^{*2} (株)オムロン(〒617 長岡京市下海印寺)。^{*3} オプトミクロン工業(株)(〒104 東京都中央区八重洲2-7-9)。

の範囲で一定値となるよう制御する。またアクリル管内圧力は、流出側ピストンアームの下流につけたブルドン管圧力計で監視し、測定中一定に保つ。

LDV 測定系は、He-Ne レーザ 5 mW を光源とした前方散乱差動形法によるもので、データ処理にはカウンタを用いる。LDV 光学系の全体（レーザ、ビームスプリッタ、収束および集光レンズ、フォトマル）を、全長 0.9 m のテーブル上に載せ、レーザ光がアクリル管軸を含む水平面上にあって、かつレンズの光軸がアクリル管軸と直交するように設置して、管の曲率の影響を除く。光学系を載せたテーブルはベッドの上を光軸方向にしゅう動し、測定点を管半径方向に移動させる。同時に、ベッド自体は管軸方向に移動できる台車の上に乗っており、それによって測定点を管軸方向に約 0.9 m にわたって動かす。

カウンタデータは 1 測定点につき 1000 個をとり、統計演算処理した結果を、流量、油温とともにパーソナルコンピュータに取り込んでフロッピーディスクに記録する。

3. データ処理

ドップラービート信号の周期を計数して得られるカウンタデータは、流速の変動、散乱粒子の速度差、測定体積内での速度こう配、ドップラーの不確定性⁽²⁾、ノイズなどによって、ある確率密度をもって分布する値をとる。したがって測定点における最も確からしい流速を定めるには、数多くとったカウンタデータの統計的处理が必要となる。今回の測定では、確率密度分

布の両端にはいるノイズの影響を排除する藤井の方法⁽³⁾を参考にした以下の手順をとる。

すなわち、まずカウンタ値 $m_i (i=1, 2, \dots, N)$ から、平均値 $\bar{m}$ 、標準偏差 σ_m を求める。次に平均値のまわりの

$$|m_i - \bar{m}| \leq \epsilon \sigma_m (\epsilon = 2.5)$$

の範囲に入るデータ m_i について、同じ操作を行う。そしてこの手順を平均値 $\bar{m}$ 、標準偏差 σ_m が収束するまで繰返す。その結果、収束した平均値 $\bar{m}_F$ をカウンタ値とする流速

$$v = \frac{N_D f_c}{k \bar{m}_F}$$

(N_D : 分周, f_c : クロック周波数, k : 定数)

を最も確からしい値として採用し、収束時の最終データによる流速換算値の標準偏差

$$\sigma v = \sqrt{\frac{\sum_i n_i (v_i - v)^2}{\sum_i n_i}} \quad \left(v_i = \frac{N_D f_c}{k m_i} \right)$$

を、流速のばらつきの指標として用いる (n_i : m_i の度数)。なお以上のデータ処理では、収束計算を流速換算値でなくカウンタ値 m_i で行うことで、速度のバイアス効果を除いている⁽²⁾。

このデータ処理方法を検証する意味で、円管内の油 (VG10) の層流 ($Re_L = 200$) および乱流 ($Re_L = 4000$) における半径方向流速分布を測ってみた結果を、それぞれ図 2 および図 3 に示す。図 2, 3 はいずれも、横軸に無次元半径位置 r/a (r : 半径方向座標, a : 管半径) をとり、縦軸には、上が LDV で測った流速 v を流量計で測った平均流速 $\bar{v}_F$ で割った $v/\bar{v}_F$ を (○), 下が

図 2 ポワジェール流れの測定結果

図 3 管内乱流の測定結果

標準偏差 σv を流速 v で割った相対標準偏差 $\sigma v/v$ を (Δ) 対数目盛でとってプロットしてある。

上の図に描いた速度分布曲線は、図2の実線がポワジュール放物線分布、一方図3では実線が速度欠損法則の実験式⁽⁴⁾

$$\frac{v_0 - v}{v^*} = -5.75 \log_{10} \frac{(a-r)}{a} + 0.3$$

破線が壁法則の実験式⁽⁴⁾

$$\frac{v}{v^*} = 5.75 \log_{10} \frac{v^*(a-r)}{\nu} + 5.1$$

による予測値である。ただし上式で、 ν は動粘度、 v_0 は管中心軸流速、 v^* は摩擦速度

$$v^* = \left(\frac{\lambda}{8} \right)^{1/2} \bar{v}_F$$

であり、管摩擦係数 λ には、Blasius の式

$$\lambda = 0.3164 Re_L^{-1/4} (Re_L = 2a \bar{v}_F / \nu)$$

を用いている。

いずれの図でも、測定された流速は、予測される分布とよく一致しており、今回の LDV 測定、データ処理方法が、油圧管路の層流のみならず乱流に対しても有効であることがわかる。

図2の相対標準偏差に描いた点線は、予想される放物線速度分布が測定体積内にもたらす最大速度差を、測定点流速に対する比として計算したものである。測定体積はレーザビーム強度分布の e^{-1} 点⁽²⁾での円体で評価し、今回使用した光学系では、その管半径方向長さが 0.5 mm である。この曲線は相対標準偏差の測定値と定性的に一致しており、層流では流速測定値のばらつきが、主として測定体積内の速度こう配によって決まることがわかる。

図2, 3の相対標準偏差 $\sigma v/v$ の、速度こう配の影響のない中心軸上の測定値を比較すれば、層流(図2)の

図4 オリフィス噴流の中心軸上流速分布測定結果 (オリフィス径 $d_0=2$ mm, 油 VG10)

場合のが 10^{-2} のオーダーであるのに対して、乱流 (図 3) では 10^{-1} と 1 けた高いオーダーを示している。前者が主としてドップラーの不確定性による測定値のばらつきであるのに対して、後者は測定体積内での速度の時間的変動に基づくと考えられる。

4. オリフィス噴流における 中心軸流速の測定

4.1 管軸方向分布 軸対称な流れの中心軸上では、半径方向に速度こう配をもたないから、オリフィス噴流の場合も、中心軸流速の LDV 測定による標準偏差は、流れの時間的変動のみに支配され、乱れそのものを表すとみなすことができる。したがって管内オリフィス下流で LDV の測定点を管中心軸に沿って動かし、各点で流速を測定すれば、圧力回復点移動という特異現象をもたらす、オリフィス噴流の構造と特性

を知る手がかりが得られると推測される。

ここでは、VG10 マシン油を用い、径 d_0 が 1, 2, 4, 8 mm の 4 種類の試験オリフィスについて測定した結果のうち、 $d_0=2$ mm および 4 mm の場合の代表例を図 4, 5 に示す。これらは、横軸にオリフィスから測定点までの距離を管内径 $d (=20$ mm) で割った無次元長さを取り、縦軸には、上の図が LDV による流速測定値 u_0 を測定流量より求めた相当ポワジュール流れの中心流速 u_{p0} で割った値を、下の図が流速の標準偏差 σ_u を u_0 で割った値を、いずれも対数目盛でとって描いてある。また各図では、流量を変えて測った結果を、(a), (b) … の順に、オリフィス穴を基準としたレイノルズ数

$$Re = \frac{4q}{\pi d_0 \nu} \quad (q: \text{流量})$$

の小さいほうから並べてある。

図 5 オリフィス噴流の中心軸上流速分布測定結果 (オリフィス径 $d_0=4$ mm, 油 VG10)

これらの結果を見ると、まず Re が小さいとき〔図 4, 5 の (a)〕, 噴流の中心軸上流速はオリフィス出口から滑らかに単調減少し、 $v_0/v_{p0} \rightarrow 1$ へと近づく。そのとき、相対標準偏差 $\sigma v/v_0$ はいずれの位置でも 10^{-2} のオーダーであり、オリフィス噴流は層流であると考えられる。次に少し Re が増すと、噴流の途中で $\sigma v/v_0$ の一部が 10^{-1} のオーダーまで増加し〔図 4, 5 の (b), (c)〕, やがて滑らかであった流速分布形状の途中で段ができる〔図 4, 5 の (c)〕。この結果は、流れに乱れが発生し始めたことを示している。

さらに Re が増えると〔図 4, 5 の (d)〕, 標準偏差に明確なピーク（最強混合点）が生じ、それとともに中心軸流速分布に、オリフィスを出てしばらく緩やかに低下した後、急激に減少する領域（急減速域）が現れる。このとき、最強混合点は急減速域の終端に位置する。

以後レイノルズ数の増加とともに、急減速域および最強混合点は上流へ動くが、 Re の値が一定以上になると、その位置に変化が見られなくなり〔図 4, 5 の (e)〕, さらに大きくなると、オリフィス直後の中心軸流速の現象が緩やかな領域（コア領域）が見られなくなる〔図 4, 5 の (f)〕。

乱れが十分発達したこのような噴流では、中心軸流速が急減速域の終わりで、いったん $v_0/v_{p0} < 1$ まで落ちた後、 $v_0/v_{p0} \rightarrow 1$ へと漸近する。一方相対標準偏差 $\sigma v/v_0$ は、最初オリフィス出口（ 10^{-1} のオーダー）から下流に向かって増加していき、乱れが下流方向に発達していく様を示す。そして最強混合点で 10^{-1} をはるかに上回るピーク値をとった後、今度は下流に行くにつれて減少し、十分下流の $v_0/v_{p0} \sim 1$ となる所では、 10^{-2} のオーダーの小さな値となる。この結果に見るように、通常の油圧管路のオリフィス噴流では、乱れは局所的であり、やがて層流へと復帰する。

レイノルズ数の変化にともなう以上のようなオリフィス噴流の構造変化は、そのレイノルズ数範囲から見て、著者らが以前に見いだした、オリフィス下流での圧力回復点の移動現象に対応していると予想される。

4・2 最強混合点とポワジュール静定距離 4 種類の径のオリフィスについて測定したすべてのデータから、 $\sigma v/v_0$ が最大値をとる最強混合点位置 X_m を読み取り、 Re に対する X_m/d の変化をプロットすれば、図 6 のようになる。図 6 を見ると、いずれのオリフィス径でも、 $Re < 1000$ の範囲で X_m が Re の増加とともに減少しているが、 $Re > 1000$ では、 Re が増加しても最強混合点は動かず、オリフィス径とは無関係にだいたい $X_m/d \sim 5$ の位置に止まることがわかる。さきに見いだした、レイノルズ数変化にともなう圧力回復点の動き⁽¹⁾と対比すれば、この結果は、最強混合点の移動と圧力回復点のそれが、本質的に同じ現象である事実を示すものと考えられる。

一方、乱流噴流が最強混合点を過ぎて下流に向かうにつれて、ポワジュール層流へと回復する位置を軸流速の分布形状から読み取り、オリフィスからその点までの距離をポワジュール静定距離 X_p として、 X_p/d を Re に対してプロットすれば、図 7 のようになる。

これを見ると、 Re の小さい範囲では、オリフィス径によらず、すべての結果は実線のような原点を通る 1 本の直線の上に乗っている。したがってこの範囲で、噴流は層流と考えられ、その影響は、オリフィス径に関係なく、レイノルズ数に比例した距離だけ下流にまで及ぶと言える。その関係を、図 7 から読み取ると

$$X_p/d = 0.078 Re$$

Re をこの範囲を超えてもう少し上げると、 X_p/d は急に大きく減少する。これは、噴流に生じた急減速域でエネルギーが消散されるため、層流であるときより

図 6 Re 数変化にともなう最強混合点の移動

図 7 穴基準 Re 数に対するポワジュール静定距離

も早く、ポワジュール流れへ回復することを意味するが、その傾向はオリフィス径が小さいほどより明瞭に見られる。その後 Re が増えていくと、再び X_p/d は増加するが、その様子はオリフィス径によって異なっている。

今オリフィス径を基準にとった Re の代わりに、管内径を基準長さにとったレイノルズ数 Re_L を横軸にとって整理し直せば、図8ようになる。この結果から、発達した乱流噴流となったオリフィス下流では、ポワジュール静定距離がオリフィス径に依存するよりも、管内径に対するレイノルズ数に支配され、それとともに増加する傾向が見てとれる。

5. 管軸方向圧力分布 と流速分布の同時測定

LDV を使った以上の測定によって得られた、オリフィス噴流が乱流から層流へと遷移する過程での構造変化によって、圧力回復点の移動現象が起こるという推論を確かめ、同時に圧力回復と噴流の構造との関係を明らかにするために、次に管中心流速と管壁圧力の軸方向分布を同時に測定する。すなわち図9のように、アクリル管に開けた圧力孔 ($\phi 0.5 \text{ mm}$) と、さきに連続圧力分布測定時に用いた試験オリフィス用ピストンアーム⁽¹⁾の端面の圧力孔との間の差圧を、定格 50 kPa の抵抗線ひずみゲージ式差圧計で測定する。同時に、LDV の測定点をアクリル管壁の圧力孔と同じ断面の管中心軸上において流速を測定し、その測定位置を順次下流から上流へと移動させる。なおこの実験では、同じレイノルズ数に対してより大きな圧力回復を得るため、粘度の高い油 (VG56) を用いる。

測定結果の一例 ($d_o=2 \text{ mm}$) を、図4, 5のと同様に描いたものを図10に示す。ただし圧力差の測定値は、

上側の図に併せてプロットし ($\blacklozenge$)、そのスケールは右縦軸上に目盛っている。

圧力と流速を同時に測定したこれらの結果から、以下の事実が明らかとなる。まず第1に、レイノルズ数の減少にともなう圧力回復点の下流方向への移動は、中心軸上流速の最強混合点ならびに急減速域の移動と完全に対応して起こっている。これより圧力回復点の移動は、オリフィス噴流構造が、乱流から層流へと変化する過程で起こる最強混合点や急減速域の移動と本質的に同じ現象であり、動圧に比べレイノルズ数の小さい油圧管路でしか検出されない現象として位置付けられる。なお、4章の流速測定結果から、オリフィス噴流が層-乱遷移流となるのは、およそ Re が $200 \sim 500$ の範囲と見積もられる。

第2に、オリフィス下流での圧力回復は、軸流速が急速に減少する過程で、動圧が一部静圧へと回復する現象であり、圧力回復点の移動は、急減速域がその位置を変えるために起こる。

第3は、圧力回復は急減速域に入るとともに起こり始める。その時点で乱れはまだ発達の途中であり、それが最大(最強混合点)となるのは、圧力回復がすでに終わった後である。このことは、いったん乱れのエネルギーに変わった流れのエネルギーは静圧に回復することなく、粘性摩擦により損失として消散することを示している。

第4に、発達したオリフィス噴流に見られる、圧力回復の前段階でいったん静圧が降下する現象については、今回の測定でその発生機構にかかわるなんらかの知見を得るには至らなかった。オリフィス下流圧力分布のよく知られたこの特徴は、おそらく噴流と管壁の間に閉じ込められた循環に関係すると考えられるが、その検討には、オリフィス噴流の半径方向流速分布の詳細な測定が必要となる。

図8 管基準 Re 数に対するポワジュール静定距離

図9 測定部

6. オリフィス噴流の構造と圧力回復点移動

以上の結果をもとに、低レイノルズ数オリフィス噴流の構造と、それを特徴づける圧力回復点移動の発生理由を考える。

オリフィス穴を出た噴流は、周囲流体との間に大きな速度こう配に起因して、せん断層を中心に乱れが発生する。速度こう配が小さければ、乱れは発生せず、噴流は層流となる。乱れは、主流からエネルギーを受けて下流に向かって発達していくが、主流のエネルギーが大きいと、オリフィスより2～3管直径下流からは

特に激しく発達し、そのために主流は急激な減速を受ける。その過程で、主流がもっていた軸方向流速の運動エネルギーの多くは乱れのエネルギーに変わるが、一部は急減速の作用で静圧に回復する。やがて乱れは、管断面全体に広がって最も強くなる。この最強混合点付近で、半径方向流速分布を測定した一例($d_0=4$ mm)を図11に示す。これからもわかるように、最強混合点付近での流れは、通常の管内乱流と同様な流速分布をもつが、乱れのオーダは10倍ほど大きい。なお、図11中の q_L/q_F は、参考のために、流速測定値を管断面で積分して得られる流量と、流量計の測定値の比を示したものである。

(a) $Re=930$ (b) $Re=1010$ (c) $Re=1110$ (d) $Re=1330$

図 10 オリフィス噴流の圧力と流速の同時測定結果 (オリフィス径 $d_0=2$ mm, 油 VG56)

図 11 最強混合点における半径方向速度分布

油圧管路のようにレイノルズ数が相対的に低い場合、この乱れのエネルギーは流れの中で粘性によって消散され、オリフィス乱流噴流は下流でポワジュール層流へと復帰する。

以上のようなオリフィス噴流の構図を考えたとき、圧力回復点そして最強混合点の遷移の発生は次のように説明される。

噴流の乱れは、主流のもつ運動エネルギーに見合っ下流に向かって発達し、それが管断面全体に均一に広がった所が、最強混合点である。乱れが半径方向に広がる強さは、主流の運動エネルギー、すなわち流量の二乗に比例するのに対して、乱れが発達しながら下流へと運ばれる距離は流量に比例するから、レイノルズ数が減少していくと、ある所で両者のバランスが逆転し、乱れが管断面全体に発達する前に減速域が下流に押し流される距離が長くなる。これが圧力回復点と最強混合点の下流方向移動が起こる理由であり、ちょうどオリフィス噴流の乱流から層流への遷移過程と対応する。一方噴流の運動エネルギーが乱れのエネルギーに変わるためには、どうしても一定以上の距離を必要とするから、レイノルズ数がいくら大きくなっても、最強混合点はオリフィスにある限度以内に近づけない。

7. 結 言

油圧管内オリフィス噴流において、LDV を使った流速測定、ならびに圧力分布測定を行った結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 管内オリフィスの噴流は、オリフィス穴を基準にしたレイノルズ数 Re が 200 前後で乱流に移行し始め、1000 を超えると安定な乱流噴流となる。

(2) このような乱流-層流遷移域は、 Re の値にしておよそ 200~500 の範囲である。

(3) 乱流となったオリフィス噴流の構造は、オリフィス穴を出た流れが、始め速度を緩やかに減じ、やがて急激に減少する。なお Re の値が大きくなると、緩減速域のほうは消えるが、その限界値はオリフィス径によって異なる。

(4) 急減速域の終端で、乱れは最も強くなるとともに管断面全体に広がり、半径方向平均流速分布は管内乱流で見られる台形状となる。よく発達した乱流噴流 ($Re > 1000$) では、この位置はオリフィスから管直径のおよそ 5 倍である。

(5) 油圧管路のようにレイノルズ数が小さいときには、その後乱れは粘性によって徐々に抑制され、流れはポワジュール層流へと静定していく。

(6) オリフィス噴流が乱流化することによって現れる急減速域では、動圧の一部が静圧に回復し、多くは乱れの運動エネルギーに転化する。この乱れのエネルギーは、静圧に回復することなく、ただ消散する。

(7) オリフィス下流で見られる圧力回復点の移動は、流量の減少にともない主流から受け取るエネルギーが減るため、乱れが半径方向に発達するよりも早く下流へと押し流され、それによって急減速域が下流方向に動くことで起こる。

(8) オリフィス噴流がポワジュール流れに静定するまでの距離は、噴流が層流の場合、 Re に比例して長くなるが、噴流に乱れが生じると、いったん短くなる。これは、乱れがエネルギー消散を助長するため、流れはかえって早くポワジュール層流へと落ち着くことを示している。

文 献

- (1) 鷲尾・ほか 5 名, 機論, 51-469, B(1985), 2297.
- (2) LDV の基礎と応用, (1980), 34, 日刊工業新聞社.
- (3) 藤井, ターボ機械, 6-2(1978), 88.
- (4) 谷, 流れ学, (1973), 153, 岩波全書.